Avaliação físico-mecânica de pastas cimentícias binárias e ternárias contendo metacaulim e finos de resíduos de construção e demolição

Dra. Daniela Oliveira de Lima
Universidade de São Paulo | Pirassununga, São Paulo | daniela.engcivil@alumni.usp.br

Me. Douglas Sadalla de Lira
Universidade de São Paulo | Pirassununga, São Paulo | douglasadalla@usp.br

Me. Ana Paula Pereira dos Santos Silva
Universidade Estadual de Maringá | Maringá, Paraná | pg55692@uem.br

Me. Deborah Grasielly Cipriano da Silva
Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Estruturas | Maringá, Paraná | deborah.silva@sistemafiep.org.br

Dr. Moisés Frías Rojas
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC) | Madrid, Espanha | mfrias@ietcc.csic.es

Dr. Holmer Savastano Junior
Universidade de São Paulo | Pirassununga, São Paulo | holmersj@usp.br

Resumo

A indústria da construção gera volumes substanciais de resíduos de construção e demolição (RCD) gerando no mundo em média 10 bilhões de toneladas de resíduos por ano. Uma estratégia é reutilizar este resíduo como eco-pozolana, promovendo a economia circular e reduzindo as emissões de CO_2. O estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de pastas cimentícias substituindo parcialmente o cimento Portland (CP) por metacaulim (MK) e finos de RCD (< 63 µm) em matrizes binárias (cimento e RCD) e ternárias (cimento, RCD e MK). Misturas binárias foram preparadas com 5–20% de RCD e misturas ternárias com até 50% de substituição (5–40%RCD, 45–10%MK). Os resultados mostram que finos de RCD podem ser usados em grandes quantidades em misturas ternárias para refinar a estrutura dos poros, reduzir a absorção de água e manter a resistência mecânica na classe de 40 MPa.

Palavras-chave: *Cimentos alternativos; Material cimentício suplementar; Matrizes ecoeficientes; Economia circular; Redução de CO_2.*

ABSTRACT

The construction industry generates substantial volumes of construction and demolition waste (CDW), generating an average of 10 billion tons of waste per year worldwide. One strategy is to reuse this waste as eco-pozzolan, promoting the circular economy and reducing CO_2 emissions. The study aims to evaluate the physical and mechanical properties of cement pastes partially replacing Portland cement (PC) with metakaolin (MK) and CDW fines (< 63 µm) in binary (cement and CDW) and ternary (cement, CDW and MK) matrices. Binary mixtures were prepared with 5–20% CDW and ternary mixtures with up to 50% substitution (5–40%CDW, 45–10%MK). The results show that CDW fines can be used in large quantities in ternary mixtures to refine the pore structure, reduce water absorption and maintain mechanical strength in the 40 MPa class.

Keywords: *Alternative cements; Supplementary cementitious material; Eco-efficient matrices; Circular economy; CO_2 reduction.*

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos resíduos de construção e demolição (RCD) constitui um fator crítico para a promoção da sustentabilidade ambiental, especialmente diante do crescimento global das atividades construtivas, que geram cerca de 10 bilhões de toneladas de RCD anualmente no mundo (YU et al., 2024). Uma estratégia viável é a substituição de matérias-primas não renováveis, priorizando a reciclagem e a reutilização de resíduos sólidos como materiais secundários. A incorporação de tais resíduos em matrizes cimentícias contribui para a redução do descarte em aterros sanitários, atenuando o risco de contaminações ambientais. Além disso, alguns resíduos podem conter propriedades pozolânicas, podendo substituir parcialmente o

cimento Portland, como é o caso dos RCD (FRÍAS et al., 2020). Gerando consequentemente, a redução do consumo de recursos naturais, gastos energéticos e a diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO_2) liberados na atmosfera durante o processo de produção do cimento Portland (SCHNEIDER, 2019).

A incorporação do RCD é limitada devido as características intrínsecas que apresenta, tais como, heterogeneidade, alta absorção de água e baixa reatividade pozolanicidade (FRÍAS *et al*., 2020). Porém, o uso do RCD combinado com pozolanas, tais como, metacaulim, escória de alto-forno e vidro reciclado podem reduzir o efeito negativo ocasionado pelo uso dos finos de RCD nas propriedades físicas, mecânicas e da durabilidade em matrizes cimentícias (DE LIMA *et al*., 2024). Ao mesmo tempo que mitiga os impactos ambientais reduzindo a disposição dos resíduos em aterros.

Esta pesquisa investiga o uso de RCD (< 63 µm) em matrizes binárias (CP e RCD) e ternárias (CP, RCD e MK) como material cimentício suplementar. O estudo visa reduzir o consumo de cimento garantindo as propriedades físicas e mecânicas das matrizes cimentícias. As composições binárias e ternárias foram analisadas quanto ao desempenho físico (absorção de água, densidade aparente e índice de vazios) e mecânico (resistência à compressão).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

As pastas binárias e ternárias foram produzidas com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), Metacaulim HP ULTRA e RCD com partículas < 63 µm. Os materiais possuem densidade e área específica do CP (3,09 g/cm³ e 1,47 m²/g), MK (2,55 g/cm³ e 1,47 m²/g) e RCD (2,44 g/cm³ e 13,55 m²/g). Aditivo superplastificante (SP), Silicon Premix 40205, à base de policarboxilato, com massa específica de 1,07 g/cm³ e fator água/material cimentício de 0,4 massa foram usados para manter o índice de consistência similar para todas as misturas. O RCD é composto por aproximadamente 98% de resíduo de concreto e 2% de resíduo cerâmico. Inicialmente, o RCD foi seco em estufa a 60 °C por 24 h. Em seguida, o material passou por moagem em moinho de bolas por 6 h. Para estudo, foi adotado o material passante na peneira de malha Tyler 250 (< 63 µm).

2.2 MÉTODOS

O RCD foi incorporado nas composições binárias substituindo parcialmente o cimento Portland nos teores e 5%, 10%, 15% e 20% em massa. As misturas ternárias foram produzidas com CP, RCD e MK, substituindo 50% do CP, a fim de avaliar a sinergia entre os materiais cimentícios suplementares em ecocimentos de baixa pegada de carbono. A Tabela 1 apresenta as formulações analisadas neste estudo. As pastas cimentícias foram preparadas em uma argamassadeira mecânica da marca EMIC, modelo AG-5, com capacidade de 5 L. Inicialmente, os materiais foram pesados e os pós foram homogeneizados manualmente. Em seguida, a mistura foi submetida a uma agitação em baixa rotação (140 rpm) por 1 minuto. Posteriormente, foi adicionado metade do superplastificante previamente diluído em água e misturado por mais 1 min. Após essa etapa, o restante do superplastificante diluído foi incorporado à mistura, que foi novamente processada por mais 1 minuto. Para garantir a completa homogeneização, as matrizes foram submetidas a uma agitação adicional em baixa rotação por 2 minutos. A consistência das pastas foi padronizada com base na matriz controle (REF), cuja consistência média foi de (44,47 ± 10) mm. O teor de aditivo superplastificante foi ajustado conforme necessário para garantir a consistência similar entre as formulações.

Tabela 1: Composição e mini abatimento (Kantro) das pastas cimentícias

Material	Controle	Binárias					Ternária					
	REF	5RCD	10RCD	15RCD	20RCD	50MK	5RCD/45MK	10RCD/40MK	15RCD/35MK	20RCD/30MK	30RCD/20MK	40RCD/10MK
CP (%)	100	95	90	85	80	50	50	50	50	50	50	50
RCD (%)	-	5	10	15	20	-	5	10	15	20	30	40
MK (%)	-	-	-	-	-	50	45	40	35	30	20	10
SP (%)	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,6	0,6	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45
Kantro (mm)	44	42	44	42	47		52	57	52	46	47	51

Fonte: Autor

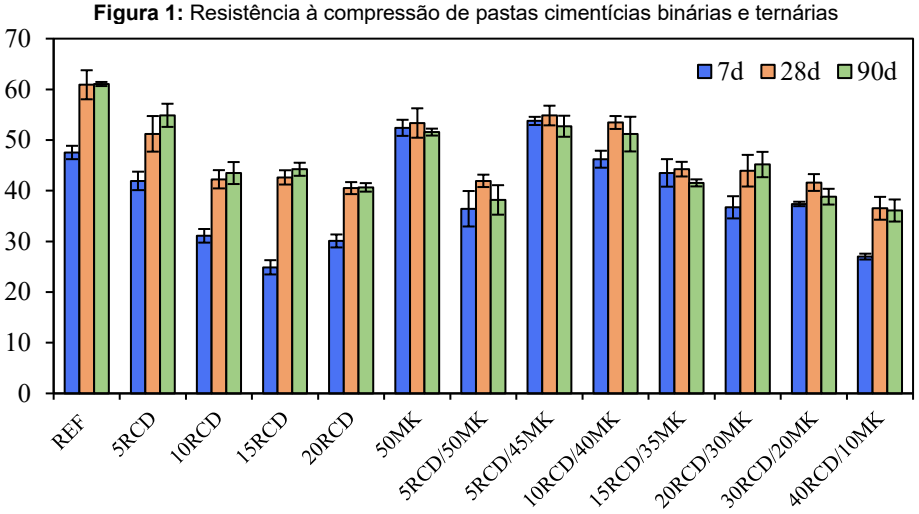
A resistência mecânica das misturas foi avaliada por meio do ensaio de compressão axial. Foram produzidos 5 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm × 25 mm (altura × diâmetro), seguindo as diretrizes da NBR 7215 (2019). Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h. Em seguida, foram armazenados em câmara climatizada de ~60% e temperatura de 23 ºC, até a realização dos ensaios nas idades de 7, 28 e

90 dias. Os ensaios de compressão foram conduzidos em máquina universal de ensaios Emic, modelo DL3000, equipada com célula de carga de 300 kN, operando a uma velocidade de deslocamento constante de 0,5 mm/min, até a ruptura dos corpos de prova. As propriedades físicas relacionadas à absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e índice de vazios (I_V) foram determinadas aos 28 dias de cura, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 9778 (2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os resultados de resistência à compressão para 7, 28 e 90 dias. Tanto as misturas binárias quanto as ternárias apresentaram decréscimo de resistência em relação à matriz controle (REF). O desempenho mecânico das misturas binárias variou de 51 a 40 MPa (5–20% RCD) aos 28 dias, reduzindo conforme o aumento do teor de RCD. A resistência das misturas ternárias variou de 55 a 36 MPa aos 28 dias, apesar de apresentarem um teor de 50% de CP. O que indica a reatividade pozolânica do MK nas matrizes. A redução da resistência mecânica era prevista devido à redução da quantidade de cimento, pois os produtos de hidratação diminuem com o aumento do teor de RCD, devido aos seus componentes inertes (WU *et al*., 2021). Essa característica é particularmente perceptível nas misturas binárias, onde o RCD atuou como *fíller* e não como pozolana. Por outro lado, a resistência à compressão foi maior para matrizes ternárias, contendo alto teor de MK, o que pode estar relacionado à reatividade pozolânica e seu efeito de preenchimento. Isso ocorre por meio da reação do MK com hidróxido de cálcio (CH) para formar silicatos (CSH) e aluminatos de cálcio hidratados (C_2ASH_8, C_3AH_6, C_4AH_{13}), que promovem o desenvolvimento de resistência. Portanto, a incorporação de RCD misturado ao MK melhora as propriedades das pastas de cimento, mantendo maior equilíbrio nas propriedades mecânicas.

Figura 1: Resistência à compressão de pastas cimentícias binárias e ternárias



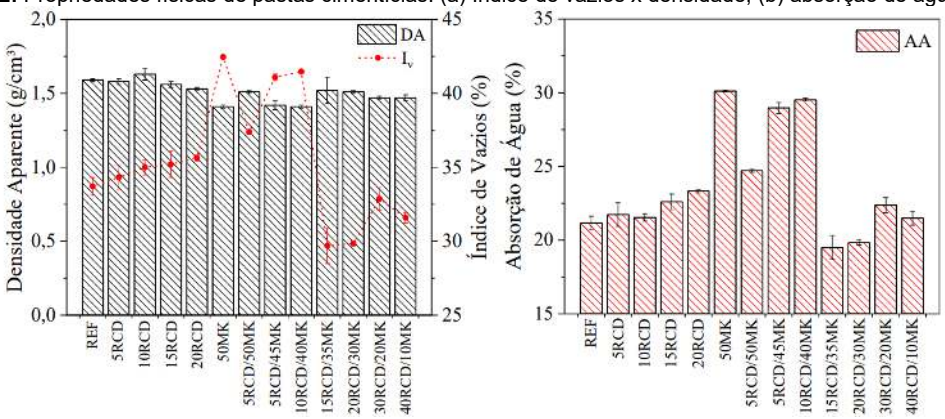
Fonte: Autor

A Figura 2 mostra os resultados das propriedades físicas como absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e índice de vazios (I_V) das matrizes cimentícias aos 28 dias. As matrizes 50MK, 5RCD/45MK e 10RCD/40MK apresentaram menor densidade, esse comportamento pode estar relacionado ao menor peso específico do RCD e do MK, que são menos densos que o cimento Portland. O RCD e o MK apresentam maior área superficial e estrutura granular rugosa em comparação aos grãos do cimento Portland. Consequentemente, quando incorporados em matrizes cimentícias, esses poros podem permanecer abertos, permitindo a penetração de água, resultando em aumento da porosidade e consequentemente absorção de água. Além disso, a redução de produtos de hidratação em pastas de cimento, principalmente em altos níveis de RCD, produz uma microestrutura mais solta e porosa, resultando em aumento do transporte de água (Wu *et al*., 2021). As composições 15RCD/35MK e 20RCD/30MK apresentaram melhor desempenho físico em comparação às demais, diminuindo cerca de 6% de AA e 11% de I_v em comparação à matriz controle.

A combinação de RCD e MK otimiza a distribuição granulométrica, resultando em redução de vazios e absorção de água entre as formulações 15RCD/35MK – 40RCD/10MK. Isso ocorre, pois, as formulações ternárias apresentaram um refinamento da estrutura dos poros devido à adição de MK, que é caracterizado pela reação pozolânica e empacotamento das partículas. Entretanto, altos teores de MK aumentaram a absorção de água, característica resultante da grande área superficial dominada pela estrutura porosa das

partículas. Por outro lado, em proporções ideais a sinergia entre o MK e o RCD melhora a estrutura dos poros, tornando-a mais uniforme, reduzindo a absorção de água. Esse comportamento pode estar relacionado principalmente à morfologia e ao efeito de preenchimento que essas matérias-primas conferem às pastas cimentícias. Combinando as propriedades físicas e mecânicas, as matrizes 15RCD/35MK e 20RCD/30MK apresentam grande potencial, embora seu desempenho mecânico seja inferior à matriz controle, a resistência mecânica mantém-se em ~45 MPa, comparável ao cimento comercial utilizado.

Figura 2: Propriedades físicas de pastas cimentícias: (a) Índice de vazios x densidade; (b) absorção de água



Fonte: Autor

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar a incorporação de resíduos de construção e demolição em pastas cimentícias binárias e ternárias com diferentes teores de cimento/material cimentício suplementar. O aumento da taxa de substituição do cimento *Portland* pela fração fina de RCD (63 µm) gerou diminuição da resistência à compressão em todas as formulações. No entanto, as misturas atendem a resistência do cimento comercial original (40 MPa), com exceção da matriz 40RCD/10MK, que, devido ao alto teor de RCD, tornou o material poroso e frágil, apresentando resistência em torno de 36 MPa.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processos n. 2020/08975-4 e n. 2014/50948-3, CNPq (processo n. 306529/2022-0) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001. Este trabalho foi apoiado pelo Ministério da Ciência e Inovação da Espanha, AEI e eRDF (CIDECAR-PID2021-122390OB-C21). Também graças ao Acordo-Quadro de Colaboração entre o IETcc-CSIC e a Universidade de São Paulo (BDC20195702).

REFERÊNCIAS

YU, Pei; LI, Tang; GAO, Sugin. Study on the effect of recycled fine powder on the properties of cement mortar and concrete. Desalination and Water Treatment, v. 319, Jul. 2024, 100481. Doi:https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100481

FRÍAS, Moisés; VIGIL DE LA VILLA, Raquel; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, Sagrario; FERNANDÉZ-CARRASCO, Lucía; VILLAR-COCIÑA, Ernesto; GARCÍA-GIMÉNEZ, Rosario. Multi-Technique characterization of a fine fraction of CDW and assessment of reactivity in a CDW/Lime system. Minerals, v. 10, Jun. 2020, 100481. Doi:https://doi:10.3390/min10070590

SCHNEIDER, Martin. The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research, v. 124, Out. 2019, 105792. Doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792

SCHNEIDER, Martin. The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research, v. 124, Out. 2019, 105792. Doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792

DE LIMA, Daniela Oliveira; DE LIRA, Douglas; FRÍAS, Moisés; SAVASTANO Jr., Holmer. Assessment of the potential use of construction and demolition waste (CDW) fines as eco-pozzolan in binary and ternary cements. Construction and Building Materials, v. 411, Jan. 2024, 134320. Doi:https:// 10.1016/j.conbuildmat.2023.134320

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7215: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação de absorção, vazios e gravidade específica. Rio de Janeiro, 2009.

WU, Huixia; YANG, Dingyi; XU, Jianguang; MA, Zhiming. Water transport and resistance improvement for the cementitious composites with eco-friendly powder from various concrete wastes. Construction and Building Materials, v. 290, Jul. 2021, 123247. Doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123247